

高出力半導体レーザーを用いた鉄鋼材料の焼入れ

Laser Transformation Hardening of Steels Using High-Power Diode Laser

萩野 秀樹* 宮田 良雄*

Hideki Hagino Yoshio Miyata

(2008年6月20日 受理)

キーワード：レーザー, 焼入れ, 半導体レーザー, 鉄鋼材料, 表面処理, 硬化処理

1. はじめに

レーザーを用いた鉄鋼材料の焼入れは、自己冷却により硬化し冷却剤が不要である。また、必要な箇所のみ選択的に処理でき熱変形が小さいといった利点があり、これまで多くの研究開発が行われてきた^{1,2)}。一方で、レーザーの初期投資、ランニングコストなどの問題で、実用化はあまり進んでいない。

近年、レーザー加工機の進歩はめざましく、従来から用いられているCO₂レーザーやYAGレーザーよりもコストや効率に優れ、操作やメンテナンスも容易な半導体レーザーやファイバーレーザーが開発され、様々な用途に対して実用化に向けた研究が活発に行われている^{3,4)}。

当研究所では、新しいレーザーの一つである高出力半導体レーザーに注目し、鉄鋼材料を対象にレーザー焼入れ処理を行い、加工条件、試料の前処理状態、表面状態、炭素量などが焼入れ挙動に及ぼす影響について調査を続けてきた。本報ではそれらの結果の一部を紹介する。

2. レーザー焼入れ実験方法

レーザー焼入れにおける種々のパラメータと焼入れ挙動の基本的な関係について調べるために、炭素鋼S45Cを試料として用いた。これは、本鋼種が構造用部材等に広く利用されているためである。試料は焼ならしを行った後、焼入れ焼戻しを行い、レーザー焼入れ実験に

供した。試料表面は平面研削盤により研削した。最終的な試料の大きさは約40×60mm、厚さ11mmである。本試料を基本試料と呼ぶ。

また、レーザー焼入れ前の組織がレーザー焼入れ挙動に及ぼす影響を調べるために、S45Cを用い、レーザー焼入れ前に焼ならしのみを行った試料(パーライト組織)に対してレーザー焼入れを行い、基本試料(ソルバイト組織)の場合と比較した。

試料の表面状態がレーザー焼入れ挙動に及ぼす影響を調べるために、基本試料に吸収剤を塗布した面(吸収剤:日本アチソン社製スパッターリリースコーティング剤)、基本試料にブラスト処理(ガラスビーズブラスト)を施した面を持つ試料に対してレーザー焼入れを行い、基本試料(研削面)の場合と比較した。

また、炭素量がレーザー焼入れ挙動に及ぼす影響を調べるために、焼ならし後に焼入れ焼戻しを施したS25C、SK85に対してレーザー焼入れを行い、基本試料(S45C)の場合と比較した。

上記の実験に用いたS25C、S45C、SK85の化学成分を表1に、試料のレーザー処理前の熱処理条件を表2に示す(JIS G 4051に準拠)。

表1 供試材の化学成分 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S
S25C	0.23	0.23	0.46	0.017	0.021
S45C	0.48	0.28	0.78	0.016	0.025
SK85	0.87	0.22	0.26	0.010	0.011

* 機械金属部 加工成形系

表2 供試材のレーザー処理前の熱処理条件 (JIS G 4051 に準拠)

	焼ならし			焼入れ			焼戻し			焼戻し後の平均硬さ
S25C	885°C	30分保持	空冷	900°C	30分保持	水冷	600°C	60分保持	水冷	170.4HV
S45C	845°C	30分保持	空冷	850°C	30分保持	水冷	600°C	60分保持	水冷	262.7HV
SK85	745°C	30分保持	空冷	790°C	30分保持	水冷	175°C	60分保持	空冷	776.0HV

レーザー焼入れの概略を図1に示す。実験に用いたレーザーは Laserline 社製半導体レーザー LDL160-1000 で、発振機から出力されたレーザー光は、光ファイバーによって伝送された後、試料に照射される。実験では試料を一定速度で移動させながらレーザー光を照射した。

レーザー照射条件は、レーザーパワー 720 W、試料移動速度 5 ~ 15 mm/s、ディフォーカス量 10 ~ 25 mm とした。ただし、レーザーパワーは試料表面上で測定した値である。ディフォーカス量は図1に示すようにレーザー光の焦点位置と試料表面間の距離である。レーザー光の強度分布は、焦点位置において直径 1 mm の大きさで均一な強度を持つ、トップハットと呼ばれる分布である。

レーザー焼入れを行った後、断面組織観察と硬さ測定を行った。断面組織観察は、切断した試料を樹脂に埋め込んで研磨した後、3% ナイタル液でエッチングした。硬さは、マイクロビッカース硬度計 (明石製作所 MVK-E) を用い、試験荷重 2.94 N(300 gf) で測定した。

3. 実験結果

(1) レーザー焼入れ基礎実験

レーザー焼入れを行った試料の断面マクロ写真を図2(a), (b)に示す。レーザー照射条件はレーザーパワー 720 W、試料移動速度 8 mm/s、ディフォーカス量 15 mm である。図から明らかなように、エッチングにより変色した領域があり、硬さを測定した結果、この領域が硬化部であった。(a)の横断面写真から硬化部は試料移動方向に垂直な断面において皿状の形状をしており、レーザー光照射部中心が最も深く、また(b)の縦断面から硬化部の最大深さはほぼ均一な厚さであることが分かる。ただし、JIS G 0559「鋼の炎焼入れ及び高周波焼入れ硬化層深さ測定方法」に準拠して、ここではビッカース硬さ 450 HV 以上の領域を『硬化部』と呼び、試料表面の硬化部の幅を『硬化幅』、硬化部の最大深さを『硬化深さ』と呼ぶこととする。

硬化部横断面において、表面から深さ 0.1 mm の位

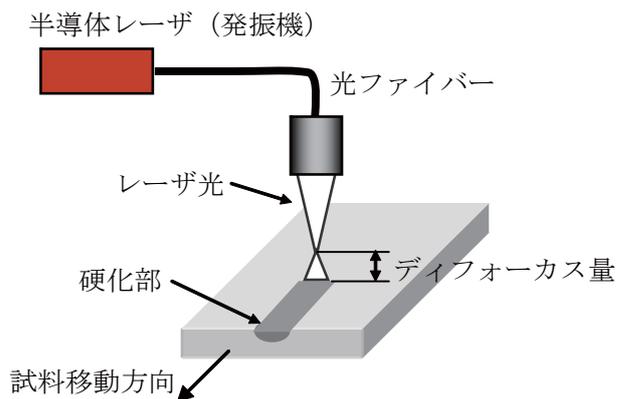


図1 レーザー焼入れの概略

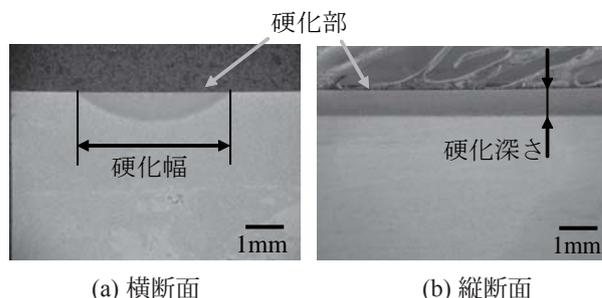
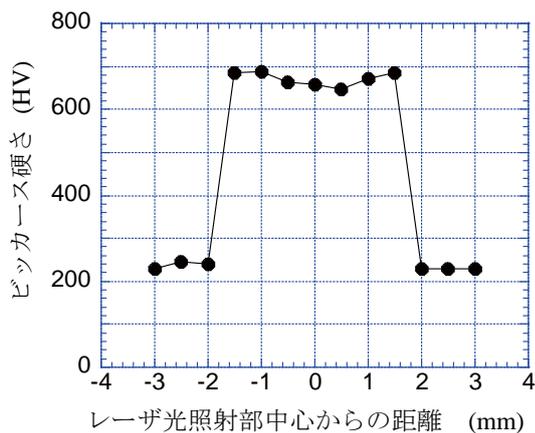


図2 レーザー照射部断面マクロ写真
レーザーパワー 720 W、試料移動速度 8 mm/s、
ディフォーカス量 15 mm

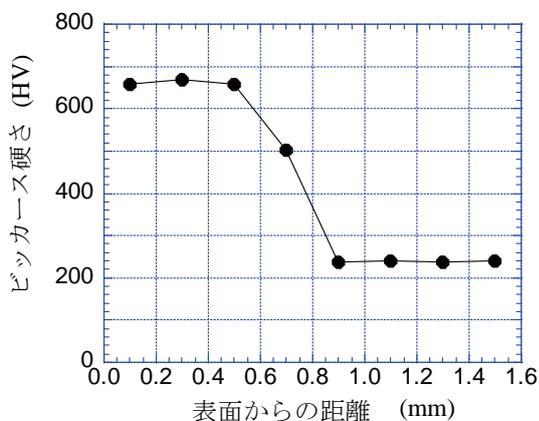
置でのビッカース硬さ分布と硬化部中心の深さ方向のビッカース硬さ分布を図3(a), (b)に示す。硬化部では 650 ~ 690 HV 程度の硬さが得られており、ほぼ均一な硬さであった。

硬化幅と硬化深さに及ぼす試料移動速度とディフォーカス量 (図中 Df と表記) の影響を図4に示す。一般にディフォーカス量が大きいくほど、ビーム径が大きいくと考えることができる。

図からディフォーカス量が一定の場合、試料移動速度が低いほど硬化幅、硬化深さはともに大きくなるという傾向がみられる。試料移動速度がそれぞれのディフォーカス量で極端に低くなった場合、レーザー照射部の温度が融点以上になり、表面が熔融する。今回の報



(a) 水平方向 (試料表面から深さ 0.1 mm の位置)



(b) 深さ方向 (硬化部中心)

図3 硬化部横断面硬さ分布
レーザーパワー 720 W, 試料移動速度 8 mm/s,
ディフォーカス量 15 mm, 測定荷重 2.94 N

告では溶融直前まで速度を低下させた条件についてのみ記述している。したがって、今回の報告の条件範囲では、ディフォーカス量が大きいほど硬化幅と硬化深さの最大値が大きくなる傾向がみられ、硬化幅 2.0 ~ 6.0 mm, 硬化深さ 0.2 ~ 1.2 mm が得られた。

今回の報告の条件範囲における上記の結果を硬化幅と硬化深さの関係で整理したものを図5に示す。幅と深さの関係はいずれのディフォーカス量においてもほぼ線形である。また、同じ硬化幅の場合でも、ディフォーカス量が小さいほど硬化深さは大きくなっており、硬化部は幅が狭く深いという傾向がみられる。

S45C 硬化部の組織写真の一例を図6に示す。図6(d)に示す試料の母材部は焼入れ焼戻しによりソルバイト組織になっているが、試料表面近傍は図6(b)に示すようにマルテンサイト組織になっており、硬度上昇の要因となっている。また、図6(a)や(c)に示される境界部近傍では、硬化部のマルテンサイト組織から母材

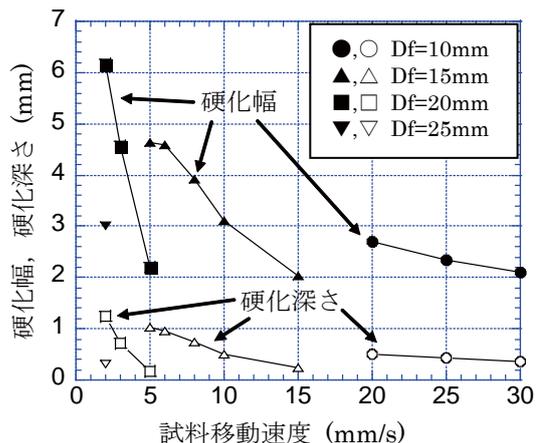


図4 レーザ照射条件と硬化部形状の関係
レーザーパワー 720 W

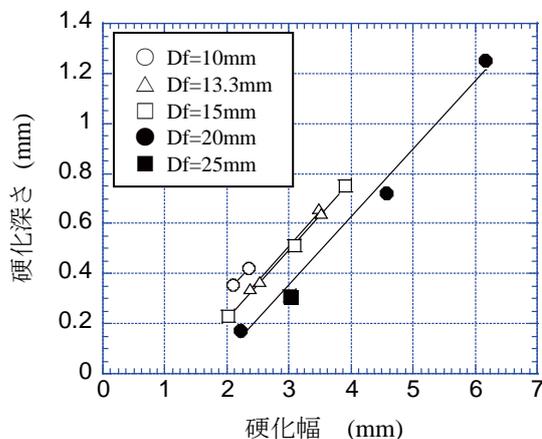


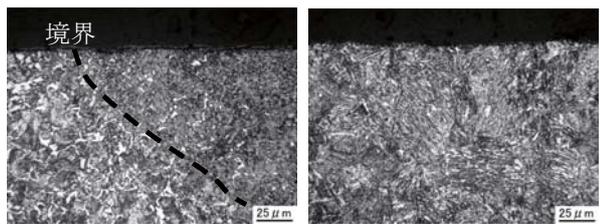
図5 硬化幅と硬化深さの関係
レーザーパワー 720 W

部のソルバイト組織へ連続的に変化している。このことが図3(b)に示した表面からの距離による硬さの変化に対応していると考えられる。

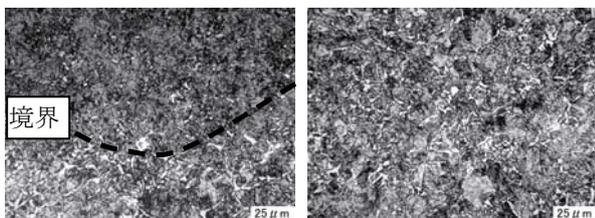
(2) レーザ焼入れ前の試料組織の影響

レーザー焼入れ挙動に及ぼすレーザー焼入れ前の組織の影響について調べた。試料の素材は S45C とし、前処理に焼ならしのみを行った試料 (パーライト組織) と焼ならし後に焼入れ焼戻しを行った試料 (ソルバイト組織) の 2 種類に対してレーザー焼入れを行った。それぞれの前処理条件は表 2 に示したとおりである。試料表面でのレーザーパワーは 720 W, ディフォーカス量は 15 mm, 試料移動速度は 8 mm/s, 試料表面は研削面とした。

硬さ分布に及ぼす前処理の影響を図7(a), (b)に示す。硬さ分布の違いを比較すると、硬化幅はほぼ等しいが、硬化深さは焼入れ焼戻し材の方が焼ならし材よりも大きい傾向がみられる。



(a) 硬化部-母材境界 (表面) (b) 硬化部中心 (表面)



(c) 硬化部-母材境界 (内部) (d) 母材

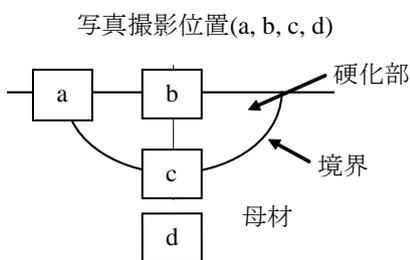
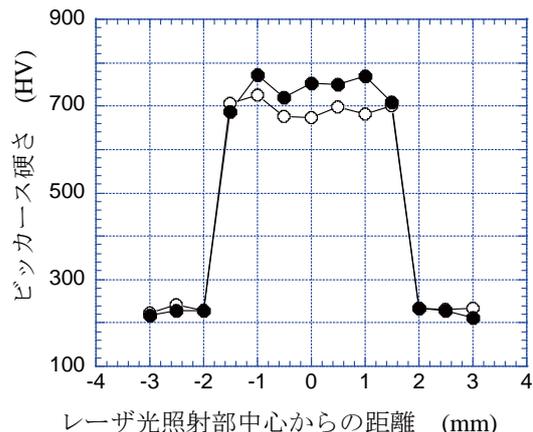


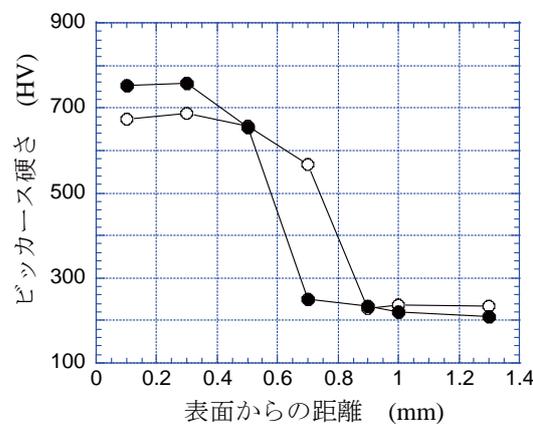
図6 硬化部の組織写真
レーザーパワー 720 W, 試料移動速度 8 mm/s,
ディフォーカス量 15 mm

硬化深さに差が生じた原因を検討するために焼ならし材の硬化部と母材の境界 (表面からの距離 0.6 ~ 0.8 mm) の硬度について調査した. 焼ならし材の硬化部と母材の境界 (試料内部) の断面組織写真を図8に示す. 硬化部には灰色の領域と白色の領域が存在しており, それぞれの領域にマイクロビッカース硬度計を用いて荷重 0.098 N(10 gf) で圧痕を打っている. 灰色領域の圧痕は白色領域の圧痕よりも小さく, 灰色領域の硬度が高いことがわかる. 従って, 灰色の領域はマルテンサイト組織, 白色の領域はフェライト粒と思われる. 白色のフェライト粒は表面に近づくにつれて小さくなるとともに少なくなっている.

このように焼ならし材では, 硬化部と母材の境界に硬度の低いフェライト粒が存在しているため, 硬度が上昇しなかったと考えられる. フェライト粒が存在しているのはレーザー照射前の組織が, 炭素分布の不均一なフェライト+パーライト組織であり, かつレーザー照射による短時間の加熱では炭素の均一な拡散が困難であるため, オーステナイト化が進んだ領域とそうでない領域が併存し, 均一なマルテンサイト変態が起こらず, フェライト粒が残存したと考えられる.



(a) 水平方向 (試料表面から深さ 0.1 mm の位置)



(b) 深さ方向 (硬化部中心)

図7 硬さ分布に及ぼす前処理の影響
(● 焼ならし材, ○ 焼入れ焼戻し材)
ビッカース硬度測定荷重 2.94 N
レーザー照射条件: レーザーパワー 720 W,
試料移動速度 8 mm/s, ディフォーカス量 15 mm

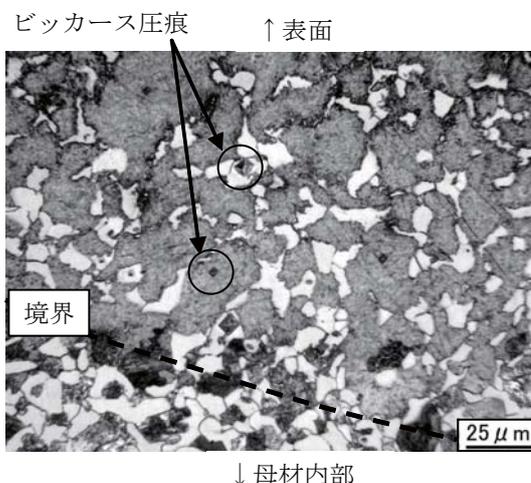


図8 硬化部-母材境界における組織写真 (焼ならし材)

一方、焼入れ焼戻し材の場合はレーザー照射前の組織がソルバイト組織であり、炭素源としての炭化物が微細かつ均一に分布しているため、レーザー照射によっても均一なオーステナイト化とそれに続いてマルテンサイト変態が生じ、硬度が上昇したと考えられる。

表面近傍での硬さは、焼入れ焼戻し材の方が低い値を示している。これは残留オーステナイトの生成が原因と思われるが、詳細なメカニズムについては今後の検討課題である。

(3) 試料表面状態の影響

焼入れ焼戻しを施した S45C を用いて試料の表面状態がレーザー焼入挙動に及ぼす影響を調べた。表面状態としては研削面 (Ra = 0.72 μm) と研削面に吸収剤を塗布した面および研削面にブラスト処理を施した面の 3 種類とした。

レーザーパワー 720 W、ディフォーカス量 15 mm として、試料移動速度を変化させた場合の硬化幅、硬化深さの変化を図 9 に示す。同じ速度で比較した場合、硬化幅と硬化深さは、吸収剤を塗布した面が最も大きく、研削面が最も小さかった。この傾向は試料移動速度が速い場合に特に顕著である。一般にレーザー光の吸収率が高いほど、試料が吸収するエネルギーが多くなり、硬化深さが大きくなるため、レーザー光の吸収率は吸収剤を塗布した面で最も高く、研削面で最も低くなっていると思われる。また、吸収率が高い場合、照射したレーザー光端部 (外周部) のエネルギー密度が低い位置においても、試料が吸収するエネルギーが多くなるため、温度がオーステナイト化温度以上に達し、硬化幅が大きくなったと思われる。

(4) 炭素量の影響

炭素量が異なる試料を用いて、炭素量がレーザー焼入挙動に及ぼす影響について調べた。用いた試料は S25C, S45C, SK85 である。それぞれの試料は焼ならし、焼入れ、焼戻し処理を施した後、表面を研削した。

レーザーパワー 720 W、試料移動速度 8 mm/s、ディフォーカス量 13.3 mm の条件でレーザーを照射した試料の表面から深さ 0.1 mm における硬さ分布を図 10 に示す。硬化部の硬さは S25C, S45C, SK85 の順で硬くなっており、炭素量が多いほど硬度が高いことがわかる。この結果は通常の熱処理と同じ傾向を示している。ただし、SK85 ではレーザー光照射部の中心から 2 ~ 3 mm の位置に母材よりも硬さが低下している領域が認められる。これは SK85 のレーザー焼入れ前の処理が焼戻し温度 175 °C の低温焼戻しであり、母材硬さが 776.0 HV であったため、レーザー照射時の入熱により高温での焼戻しが生じた領域だと考えられる。

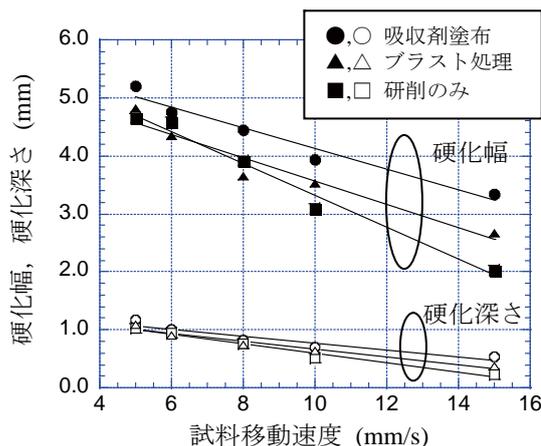


図 9 表面状態と硬化部形状の関係
レーザーパワー 720 W, ディフォーカス量 15 mm

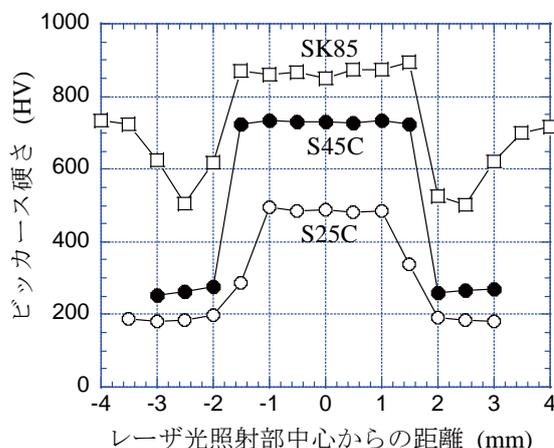


図 10 水平方向の硬さ分布に及ぼす炭素量の影響
試料表面から深さ 0.1 mm の位置
ビッカース硬度測定荷重 2.94 N
レーザーパワー 720 W, 試料移動速度 8 mm/s,
ディフォーカス量 13.3 mm

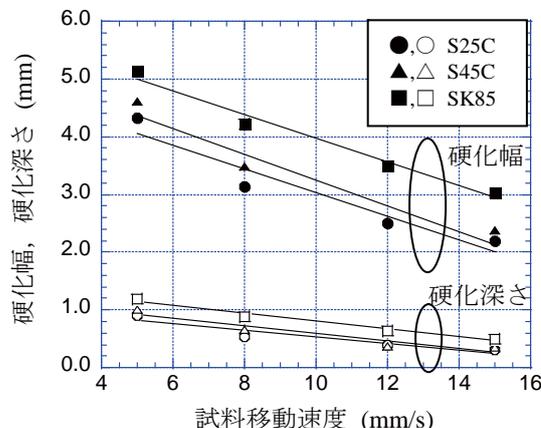


図 11 レーザー照射条件と硬化部形状の関係
レーザーパワー 720 W, ディフォーカス量 13.3 mm

レーザー照射条件と硬化幅、深さの関係を図 11 に示す。ただし、これまでと同様に JIS G 0559「鋼の炎焼入れ及び高周波焼入れ硬化層深さ測定方法」に準拠して、S25C の場合はビッカース硬さ 350 HV 以上の領域を『硬化部』と呼ぶ。また、SK85 の場合は図 10 に示すように、レーザー光照射部の中心から 2～3 mm の位置に軟化部があるため、レーザー焼入れにより生じた変色領域を『硬化部』とした。

硬化幅や硬化深さは、ともに炭素量が多い方が大きくなる傾向がみられた。これは炭素量が多いほど焼入れ性が高いため、レーザー光端部(外周部)のエネルギー密度が低く、温度上昇が小さい位置においても、硬化したと考えることができる。また、いずれの試料についても試料移動速度が上がるにつれて硬化幅、硬化深さは小さくなるという傾向が認められた。これは速度が速いほどオーステナイト化温度以上に加熱される領域が小さくなったためと考えられる。

4. まとめ

鋼のレーザー焼入れの実用化を目的に、半導体レーザーを用いた鉄鋼材料(主に炭素鋼 S45C)の焼入れ基礎実験を実施した。レーザー照射条件、試料の前処理条件および表面状態の違いが焼入れ挙動に及ぼす影響を調べるとともに、S45C 以外に S25C や SK85 など炭素量の異なる材料を取り上げ、炭素量がレーザー焼入れ挙動に及ぼす影響についても検討した。これらの知見に関する詳細は以下に示すとおりである。

(1) レーザー焼入れによる硬化部の形状は試料移動方向

に垂直な断面(横断面)においては皿状で、硬化深さはレーザー光照射部中心が最も大きかった。また、試料移動方向に平行な断面(縦断面)では均一な深さであった。

- (2) 今回のレーザー照射条件で得られた硬化部の大きさは、硬化幅 2.0～6.0 mm、硬化深さは 0.2～1.2 mm であった。硬化幅や硬化深さを大きくするためには、ディフォーカス量を大きく設定し、試料が溶融しない範囲で移動速度を小さくすればよい。
- (3) 前処理状態の異なる焼ならし材と焼入れ焼戻し材の焼入れ挙動を比較した結果、焼入れ焼戻しを施した試料の硬化深さは大きく、硬さの均一性も高かった。
- (4) 試料の表面状態の違いとして、研削面、研削面に吸収剤を塗布した面、研削面にブラスト処理を施した面の比較を行った結果、硬化幅や深さは吸収剤を塗布した場合が最も大きかった。
- (5) 試料に含まれる炭素量については、炭素量が多いほど焼入れ性が高いため、炭素量が多くなるにつれて、硬化幅や硬化深さが大きくなり、硬度も高くなる傾向がみられた。

参考文献

- 1) K. Stanford: Metallurgia, **47** (1980) p.109.
- 2) 三宅正司：レーザー表面改質の現状と展開，日本溶接協会表面改質技術研究委員会編，日本溶接協会 (2001) p.41.
- 3) 阿部信行：レーザー加工学会誌, **9** (2002) p.7.
- 4) 辻 正和，他：レーザープロセッシング応用便覧，レーザー学会編，エヌジーティー (2006) p.106.